

С.В. Мишин

(Северо-восточный комплексный научно-исследовательский институт им. Н.А. Шило ДВО РАН; e-mail:mishin@neisri.ru)

МОДЕЛЬ ОБВАЛЬНОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

Проведён анализ количественных параметров модели землетрясения. Передача механического импульса рассматривается как важнейший фактор сейсмических процессов. Материал может быть полезен при решении проблем техносферной безопасности.

Ключевые слова: механический импульс, сейсмическое событие, кинетическая энергия.

S.V. Mishin

CREEP EARTHQUAKE MODEL

Quantitative parameters of the earthquake model are analyzed. The transition of mechanic impulse is determined as the most imported factor of seismic processes. The material can be helpful in solving the problems of technosphere safety.

Key words: mechanic impulse, seismic event, kinetic energy.

Статья поступила в редакцию Интернет-журнала 30 октября 2013 г.

Введение

Процесс обвального землетрясения протекает нагляднее, в сравнении с тектоническими и вулканическими толчками. Сейсмические эффекты непосредственно следуют за ударом при падении массы горных пород на жёсткое основание. Можно выяснить, как формируется сейсмический сигнал в результате удара. Очень простые опыты показывают, что интенсивность сейсмических сигналов при ударах равных энергий, но разных масс неодинакова – сигналы пропорциональны значениям масс ударяющих тел. А при ударах разных масс, передающих основанию одинаковые количества движения, сигналы оказываются одинаковыми. Из механики известно, что при ударах тела обмениваются импульсом. Механический импульс характеризует движение тела и имеет шесть компонент – три поступательные и три вращательные. При столкновении массивных тел импульс перераспределяется в этих телах, действуют законы Ньютона – сила есть изменение импульса и действие равно противодействию. Механический импульс связан в механике с кинетической энергией; кинетическую энергию можно вычислять из соотношения

$$E = P^2/2M = Mv^2/2,$$

где P – импульс,

M – масса тела, движущегося со скоростью v .

При поступлении в материал основания импульс распространяется по законам удара, формируя пакет излучения. Поступательный импульс (количество движения) распространяется со скоростью продольных волн, а вращательный импульс (момент количества движения) распространяется в виде поперечных

волн. На поверхности фронта волны действуют ньютоновские силы dP/dt (производные импульса по времени). Эти силы определяют давление фронта волны при передаче импульса от возбуждённых частиц среды невозбуждённым частицам.

Наглядной моделью сейсмического события может служить дробление камня с помощью молотка и зубила. Что разбивает камень? Молоток вообще не касается камня в процессе разбивания, зубило контактирует с камнем в узкой зоне, а осколки отлетают от камня далеко от зоны контакта с зубилом. Немного логики и становится ясно, что камень разрушался сейсмическим излучением, сформированным при ударе молотка об обушок зубила и распространившимся вдоль зубила как вдоль проводника сейсмического излучения. В результате удара молотка обушок зубила приобрёл механический импульс (количество движения); этот импульс распространился со скоростью сейсмических волн вдоль металла и был передан камню в зоне его контакта с зубилом. Изменение количества движения, по определению, есть ньютоновская сила и действует эта сила на поверхности волнового фронта, на границе, разделяющей в данный момент частицы камня, ещё не приобретшие импульс от частиц, уже обладающих импульсом. Действие ньютоновских сил приводит к разрыву сплошности камня, а избыток импульса определяет движение массивных обломков.

Параметры обвального землетрясения

Сейсмическое событие можно характеризовать интенсивностью сейсмического излучения – значением переданного в среду импульса, а также распределением в пространстве и во времени ньютоновских сил – производных импульса по времени.

Обвальное землетрясение – это удар при торможении сместившегося в поле силы тяжести блока горных пород. Если **масса** блока M упадёт с **высоты** h , то блок приобретёт кинетическую **энергию**, равную потенциальной $E = Mgh$. При этом масса M приобретёт импульс $P = M\sqrt{2gh}$ (так как $E = P^2/2M = Mgh$).

Импульс – важная характеристика сейсмического события, поэтому характеризовать очаг землетрясения следует именно в единицах импульса ($кгм/с$). Величины "магнитуды" и/или "энергетического класса" должны иметь размерность импульса. Магнитуда $M2$ соответствует импульсу 10^9 $кгм/с$, а $M5 \approx 10^{13}$ $кгм/с$.

Сформированный в процессе удара блока пакет сейсмического излучения (механического импульса) распространяется в окружающей среде в виде сферического слоя со скоростью сейсмических волн. Значение импульса остаётся постоянным, а поверхность сферического слоя непрерывно увеличивается, отчего плотность импульса на поверхности фронта излучения непрерывно падает. **Плотность импульса** на единицу площади фронта на расстоянии R от места удара (очага землетрясения) можно оценить значением:

$$G = P/4\pi R^2 \text{ (кгм/с/м}^2\text{)}.$$

При передаче импульса от одних частиц среды другим действуют ньютоновские силы $F = dP/dt$, поэтому фронт излучения создаёт **давление** на окружающую среду

$$N = dG/dt \text{ (H/м}^2\text{)}.$$

Именно давление волнового фронта создаёт известные сейсмические эффекты – движение массивных тел, разрушение строений и пр. Величина давления зависит от плотности импульса на поверхности фронта излучения и от длины волны излучения (времени нарастания импульса в процессе удара). В очаге продолжительность удара можно оценить временем распространения продольной волны в теле блока:

$$\Delta t = L/v_p,$$

где L – длина блока;

v_p – скорость продольных волн.

В процессе распространения импульса в неоднородной среде, возможно, волновой пакет изменяется, становится сложнее, поэтому при оценках величины сейсмического давления N мы считаем возможным использовать время нарастания амплитуды первого вступления на сейсмограмме (четверть первого периода колебаний) в качестве средней **продолжительности действия** фронта τ . Тогда средняя величина **давления** фронта на окружающую среду на расстоянии R от очага составит:

$$f = G/\tau.$$

Простые соотношения ньютоновской механики позволяют грубо оценивать основные параметры процесса обвального землетрясения. Почти такие же соотношения могут применяться для оценки параметров сейсмического действия взрывов. При взрывах потенциальная химическая энергия переходит в кинетическую энергию массы продуктов ВВ и формирование пакета сейсмического излучения, которое идентично излучению при ударах.

Фронт сейсмического излучения создаёт давление на среду за счёт изменения импульса (ньютоновская сила). Давление 10^4 H/м^2 соответствует 4-5 баллам макросейсмической шкалы MSK-64, а давление 10^6 H/м^2 – 8-9 баллам. Основные параметры процесса формирования сейсмического события измеряются сейчас неточно, поэтому полезно прибегать к графическим построениям.

На рис. 1 приведена номограмма, позволяющая оценивать основные параметры процесса.

Левая часть номограммы позволяет оценить значение механического импульса при падении массы M с высоты h (крайние левые оси номограммы). Значение импульса читается на оси P справа, слева на оси – значения магнитуды толчка. Центральная часть номограммы – оценка расхождения излучения на расстоянии R от очага. Результат – значение плотности импульса на фронте излучения – считывается на оси G . Правая часть номограммы – оценка сейсмического давления на фронте волны в зависимости от длительности воздействия. Результат считывается на оси f , далее значения скорости смещения "грунта" в пункте, удалённом от очага на расстояние R , ожидаемые смещения и предполагаемая интенсивность сотрясения в баллах MSK-64.

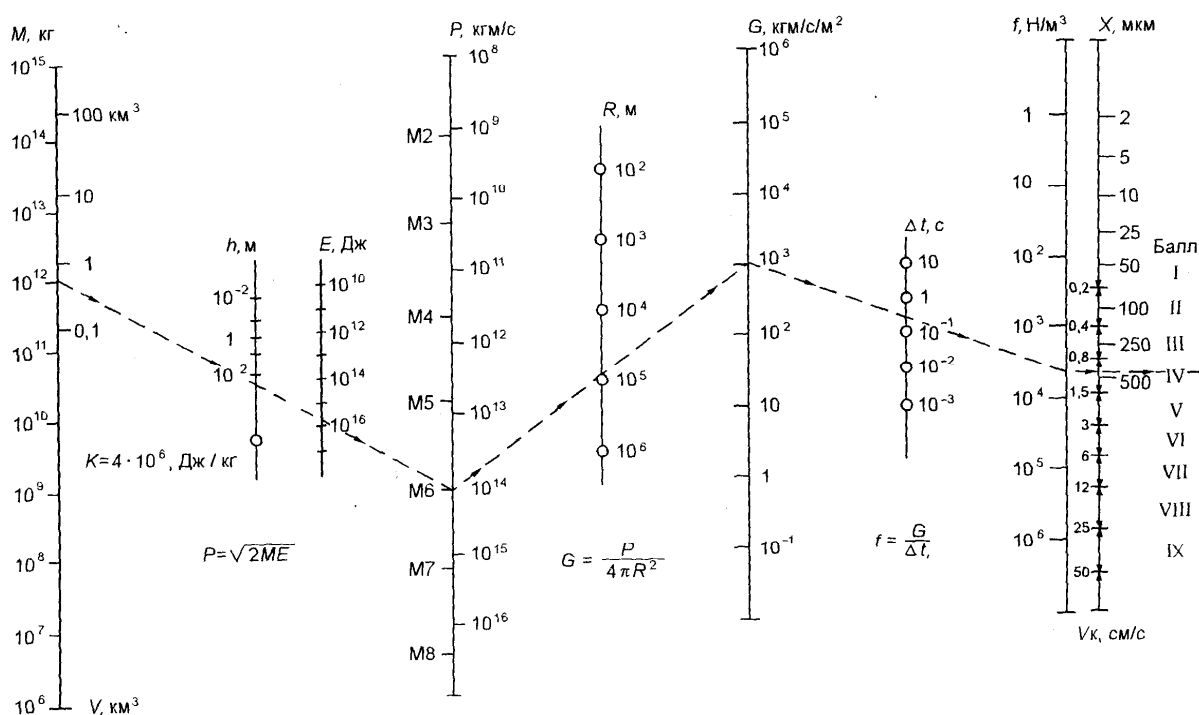


Рис. 1. Номограмма для оценки параметров обвального землетрясения

Пунктирная линия соответствует обвалу 300 млн м³ горных пород с высоты 200 м. На территории Магаданской области обследованы Б.П. Важениным обвальные тела такого объёма [2], события произошли в голоцене, и материал обвалов позволяет количественно оценивать процессы. Подобный процесс рассматривался Б.Б. Голицыным [4].

Удар при падении массы 10¹² кг с высоты 200 м отдал окружающей среде импульс 10¹⁴ кгм/с, что соответствует по нашему мнению магнитуде $M = 6$. На расстоянии 100 км от места обвала плотность импульса на поверхности волнового фронта составила 10³ кгм/с/м². Если четверть периода волны составляла 0,2 с, то волна создавала давление порядка 5×10^3 Н/м², что соответствует 4 баллам нормативной шкалы MSK-64.

Явление цунами следует отнести к сейсмическим эффектам землетрясения – сотрясению жидкой среды. Моделировать цунами можно в тарелке с жидкостью ударами разной силы и направления по основанию (столу), на котором установлена тарелка. В 1958 г. в бухте Литуя на Аляске отмечался высокий заплеск воды после падения в воду массы льда и грунта (около 300 млн м³) с высоты около 900 м. Волновой заплеск превосходил 500 м в отдельных зонах побережья бухты [10]. Вода в бухте приобрела механический импульс, которым обладала твёрдая масса в момент падения в воду. Если бы падающая масса не обладала могучим механическим импульсом, а сползла бы в воду с соседнего холма, представляется маловероятным наблюдавшийся эффект. Во время землетрясения дно акватории ударяет по водной среде, и механический импульс распространяется в воде со скоростью звука. Достигая поверхности моря, импульс приводит к движению поверхностных масс, к их течению, а в определённого вида бухтах вода собирается в виде высоких волн цунами.

Сейсмические события

Сейсмическим событием назовём любой процесс, приводящий к формированию сейсмических сигналов, регистрируемых сейсмоприемником. Такие события – удары и взрывы, порывы ветра и волнение моря создают лишь помехи при регистрации землетрясений. Чем же отличаются землетрясения от других источников сейсмического излучения? **Тектоническое землетрясение**, как пишут, есть разрядка упругих напряжений, накопленных геологическими телами в процессе деформации. **Вулканическое землетрясение**, сопровождающее или предвещающее извержение вулкана, связано, по-видимому, с тепловыми процессами при формировании и перемещении лавы. **Обвальное землетрясение** – удар при торможении массивного тела. **Взрыв** – результат химического превращения взрывчатки – сопровождается пакетом сейсмического излучения, очень похожим на местное землетрясение или на удар при разгрузке самосвала.

По поводу упругих напряжений можно полагать, что накопление (аккумуляция) упругой энергии в горных породах – явление маловероятное. Закон Гука справедлив для небольших напряжений, действующих короткое время на небольшие тела. Ни одно из этих условий в земных недрах не выполняется: многотонные давления действуют на огромные геологические тела в течение тысяч лет. Хорошо известны процессы релаксации упругой энергии со временем, но процессы накопления упругости освещены в литературе слабо. Ещё менее вероятна мощность, характерная для процессов землетрясения, для процессов разрядки упругих напряжений. Наиболее мощными механизмами, действующими на принципе упругой отдачи, остаются лук, арбалет и хулиганская рогатка. Вулканические землетрясения, как показал В.М. Зобин [6], мало отличаются от тектонических.

Очень многие "тайны" сейсмических процессов легко объясняются, если понять, что **сейсмическое излучение есть распространение механического импульса** в системе связанных масс. В отличие от многих видов потенциальной энергии (гравитационной, упругой, электромагнитной, химической), только кинетическая энергия связана с импульсом. Таким образом, необходимым условием проявления сейсмического события является переход некоторой потенциальной энергии в энергию кинетическую. Следующим необходимым условием является **торможение** движущейся массы и передача импульса неподвижной среде в виде **удара**. Суть сейсмического события сводится к распространению механического импульса в системе связанных масс. Фронт распространяющегося возмущения давит на материальные структуры, что приводит к известным сейсмическим эффектам – перемещению и разрушению массивных тел.

Горное сооружение

Условием возникновения обвального землетрясения является наличие градиента потенциальной энергии – попросту говоря, наличие крутого склона, с которого может съехать массивное тело. Наибольшие значения таких градиентов на Земле отмечаются в Тихоокеанском кольце – глубины океанических впадин достигают 10 км, западное побережье океана обрамляется могучими Кордильерами, возвышающимися над океанским дном тоже на 10 км. Массивы

горных пород столетиями остаются в состоянии покоя, опираясь на другие геологические тела, составляющие земные недра. Природные структуры, обладающие запасами потенциальной энергии тяготения, по отношению к окружающим элементам, мы называем горными сооружениями. Горное сооружение создаёт дополнительное давление на опорные поверхности. В соответствии с кинетической теорией прочности [5], твёрдое тело не может выдерживать нагрузку бесконечно долго – оно непременно разрушится через определённый интервал времени τ , именуемый долговечностью существования тела под нагрузкой σ . Чем глубже опорная площадка массы горного сооружения, тем большую нагрузку она испытывает. Очаги землетрясений Магаданской области располагаются обычно на глубинах 5-10 км, давления на этих глубинах составляют 15000-30000 тонн/м² или 150-300 МПа. Поведение твёрдых материалов при таких давлениях часто отличается от привычных форм таких тел при малых давлениях [7]. Заметим, что под вершиной горного сооружения давление выше, чем в соседних участках, то есть кроме высокого гидростатического давления здесь имеется и градиент давления тем больший, чем выше горное сооружение по отношению к долине. Например, при высоте горы в 1 км относительно подножия разница в давлениях составит около 3000 тонн/м² или 3 МПа.

Горное сооружение "Морджет" располагается в 30 км к востоку от г. Сусумана. Максимальные отметки высоты достигают здесь 2100 м над уровнем моря. За 40 лет в радиусе 30 км от центра сооружения зарегистрировано 15 землетрясений энергетических классов $K > 8$, в том числе 4 толчка энергетических классов $K > 10$. Вес сооружения над уровнем изогипсы 600 м оценивается 15×10^{11} тонн, запасы энергии тяготения над этим уровнем – 12×10^{17} Дж.

Поверхность участка оцифрована с шагом 1 км, форма модели поверхности представлена на рис. 2.

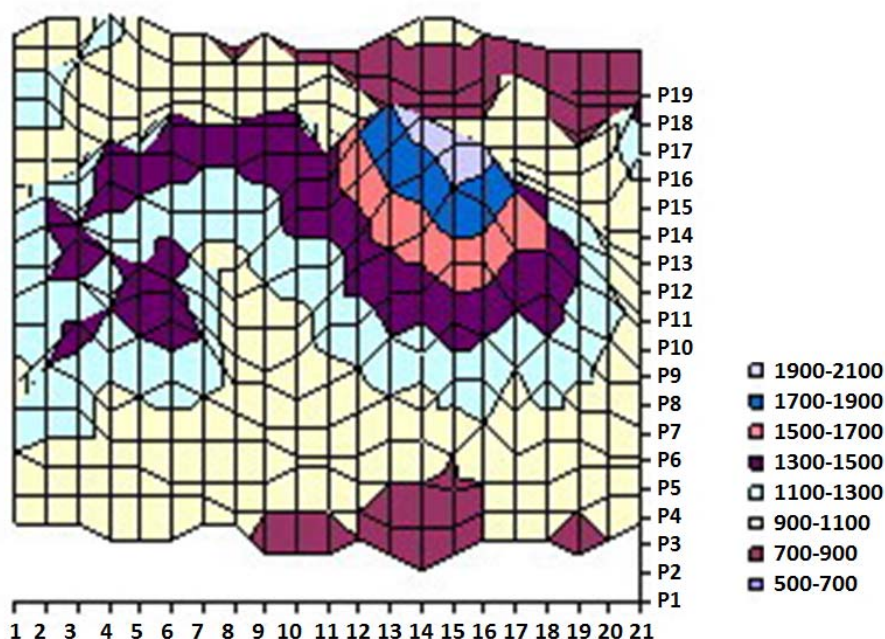


Рис. 2. Модель формы поверхности горного сооружения "Морджет"

На рис. 3 представлена форма нижней кромки горного сооружения "Морджет", рассчитанная для плотности геологического тела $\rho = 2,5 \text{ тонн/м}^3$, и плотности подстилающей среды $\rho = 3 \text{ тонны/м}^3$. Глубина опорной поверхности достигает 10 км, а давление в этой зоне превосходит 30000 тонн/м^2 (3000 кг/см^2).

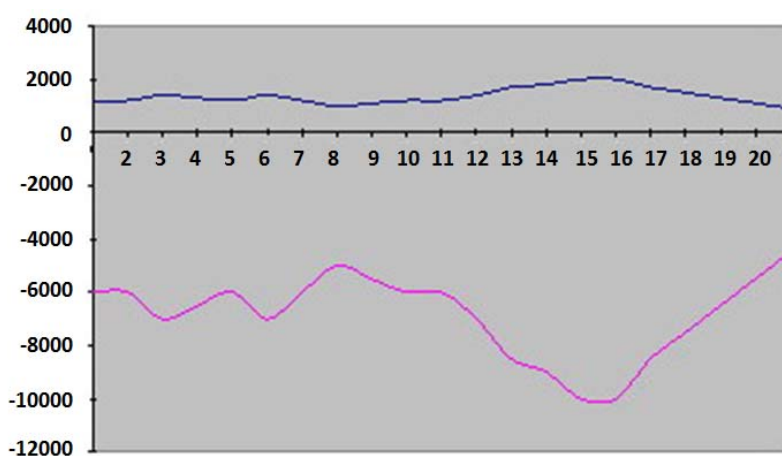


Рис. 3. Разрез горного сооружения "Морджет" по вертикали 15

Автор полагает, что процесс землетрясения начинается с разрушения опорной площадки, на которую опирается блок горных пород – часть горного сооружения. В результате разрушения опоры блок приходит в движение, приобретая кинетическую энергию и соответствующий механический импульс. При торможении перемещения блок отдаёт новым связям приобретённый импульс, который распространяется в твёрдой среде в виде сейсмического излучения. Образцы стали при экспериментах по разрушению сжатием разрушались при давлениях 27300 кг/см^2 [1]. Нагрузки на опорную среду в наших моделях не превосходят 3000 кг/см^2 , однако землетрясения в рассмотренных зонах отмечаются. Глубины очагов землетрясений Магаданской области, как правило, не превосходят 10 км, то есть их гипоцентры концентрируются в телах горных сооружений. Геологические тела неоднородны, складывающиеся их блоки содержат нарушения, отчего они смещаются не только на нижних границах.

Горное сооружение представляет собой сложнейшую конструкцию геологических тел разного состава, её устойчивость определяется, главным образом, характером тяготения Земли и прочностью опорных горизонтов. Каркас сооружения выдерживает постоянные огромные весовые нагрузки, кроме того, на связи между элементами в течение длительного времени действуют тепловые и геохимические процессы, приливные силы. В результате длительной истории взаимодействий часть связей между геологическими телами разрушается и структура приходит в движение – перемещаются её отдельные элементы. Механическое движение масс характеризуется кинетической энергией, равной изменению потенциальной энергии структуры. Появление кинетической энергии определяет формирование пакета сейсмического излучения, воспринимаемого при значительных размерах как землетрясение. Изменение оптимальной структуры горного сооружения происходит обыкновенно в виде последовательных дискретных смещений ряда элементов конструкции, которые формируют рои землетрясений или афтершоковые последовательности.

Широко распространена легенда о том, что появление трещин – разрыв сплошности пород – генерирует сейсмическое излучение. Разумеется, это не так. Трещина – след сместившейся массы – является индикатором разрыва твёрдого тела, индикатором процесса разрушения, требующего затраты энергии. Кинетическая энергия, которая может совершать работу разрушения, появляется при перемещении геологического тела в поле тяготения Земли.

Заключение

Причины землетрясений объясняются в настоящее время на основе только трёх предположений – наиболее распространено представление о разрядке упругих напряжений; имеется также интересная модель землетрясения как "подземной молнии" – разряда накопившихся зарядов [3]; наконец, используемая автором ударная модель, восходящая к Э. Зюссу и Б.Б. Голицыну [8, 9]. Автор полагает, что практически все землетрясения нашей планеты происходят как удары при перемещении геологических тел.

1. Сейсмическое излучение представляет собой распространение в материальном пространстве механического импульса. В источнике излучения происходит переход потенциальной энергии (гравитационной, химической, электромагнитной, упругой) в кинетическую энергию движущихся масс. Массы приобретают импульс и передают его в пространстве по законам механики удара.

2. Сотрясения материальных систем представляют собой механическое движение связанных масс, которое определяется действием ньютоновских сил, связанных с изменением импульса, принесенного сейсмическим излучением.

3. Землетрясение – природный источник сейсмического излучения, связанный с перемещением блока горных пород.

4. Сейсмическая активность участка территории сопровождает процессы преобразования рельефа территории, определяется наличием градиентов потенциальной энергии, числом и размерами блоков, удерживаемых в покое прочностью контактовых зон.

Литература

1. **Бриджмен П.** Исследования больших пластических деформаций и разрыва. М.: ИЛ, 1955, 444 с.
2. **Важенин Б.П.** Принципы, методы и результаты палеосейсмогеологических исследований на Северо-Востоке России. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2000. 206 с.
3. **Воробьев А.А.** Физические условия залегания глубинного вещества и сейсмические явления. Томск: ТГУ, 1974. часть 1, 272 с.; часть 2, 228 с.
4. **Голицын Б.Б.** О землетрясении 18 февраля 1911 г. / Избранные труды. Т. 2. М.: Изд-во АН СССР, 1960. С. 365-370.
5. **Журков С.Н.** Дилатонный механизм прочности твёрдых тел // Физика прочности и пластичности. Л.: Наука, 1986. С. 5-11.
6. **Зобин В.М.** Динамика очага вулканических землетрясений. М.: Наука, 1979, 92 с.
7. **Механические** свойства материалов под высоким давлением (под ред. Х. Л. Пью). Вып. 1. М.: Мир, 1973. 296 с.
8. **Мишин С.В.** Сейсмические процессы и сохранение импульса. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2004, 115 с.
9. **Мишин С.В.** О физике сейсмических процессов. LAP Lambert Academic Publishing (<http://www.lap-publishing.com>), 2013. 196 с.
10. **Щетников Н.А.** Цунами. М.: Наука, 1981. 88 с.